

(19)

Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 846 617 A2

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
10.06.1998 Patentblatt 1998/24

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: B64C 21/10

(21) Anmeldenummer: 97120247.8

(22) Anmeldetag: 19.11.1997

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC  
NL PT SE  
Benannte Erreichungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder:  
Bechert, Dietrich W., Dr.  
10625 Berlin (DE)

(30) Priorität: 05.12.1996 DE 19650439

(74) Vertreter:  
Patentanwälte Rehberg + Hüppe  
Am Kirschberge 22  
37085 Göttingen (DE)

(71) Anmelder:  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
53127 Bonn (DE)

(54) **Oberfläche für eine von einer Strömungshaupttrichtung aufweisenden Strömung turbulent umströmten Wand**

(57) Eine Oberfläche (2) ist für eine Wand vorgesehen, die von einer Strömung mit einer Strömungshaupttrichtung turbulent überströmt wird. Die Oberfläche (2) weist in der Strömungshaupttrichtung ausgerichtete und seitlich zu der Strömungshaupttrichtung beabstandete

Rippen (6) auf, deren Höhe (8) 45 % bis 60 % des seitlichen Rippenabstand beträgt. Die Rippen (6) sind keilförmig ausgebildet mit einem Keilwinkel (7) von 20 ° bis 50 °.

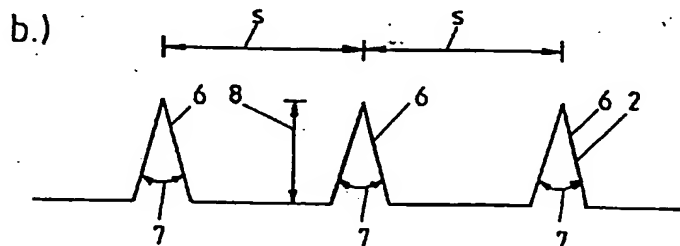


Fig.2

EP 0 846 617 A2

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Oberfläche für eine von einer Strömungshaupttrichtung aufweisenden Strömung turbulent umströmte Wand, mit in der Strömungshaupttrichtung ausgerichteten und seitlich zu der Strömungshaupttrichtung beabstandeten Rippen, deren Höhe 45 % bis 60 % des seitlichen Rippenabstands beträgt.

Oberflächen der eingangs beschriebenen Art dienen dazu, den turbulenten Impulsaustausch zwischen der Strömung und der Wand an der Oberfläche zu behindern. Soweit dies erreicht wird, tritt eine Verminderung der Wandreibung auf.

Eine Oberfläche der eingangs beschriebenen Art wird in M. Bruse, D. W. Bechert, J. G. T. van der Hoeven, W. Hage und G. Hoppe: Experiments with conventional and with novel adjustable drag-reducing surfaces, Int. Conf. on Near-Wall Turbulent Flows, Tempe, AZ, USA, 15. bis 18. März 1993, Proceedings published by ELSEVIER, Amsterdam beschrieben. Hier sind die Rippen im Querschnitt linienförmig ausgebildet. Bei einer Höhe der Rippen von 50 % des seitlichen Rippenabstands wird bei einem an die jeweilige Strömung optimal angepassten seitlichen Rippenabstand eine Verminderung der Wandreibung von bis zu 10 % erreicht. Allerdings ist diese bekannte Oberfläche für die praktische Anwendung beispielsweise bei einem Flugzeug ungeeignet, da die im Querschnitt linienförmigen Rippen schwer herzustellen sind und keine ausreichende Stabilität aufweisen.

Aus der EP 0 205 289 A 1 sind verschiedene Oberflächen für eine von einer Strömungshaupttrichtung aufweisenden Strömung turbulent umströmten Wand bekannt. In jedem Fall weist die Oberfläche eine Vielzahl von direkt aneinander angrenzenden Rippen auf, die in der Strömungshaupttrichtung angeordnet sind. Bei einer keilförmigen Ausbildung der Rippen, wie sie in der älteren Europäischen Patentanmeldung beschrieben ist, sind der seitliche Rippenabstand und die Höhe der Rippen gleich groß. In der EP 0 205 289 A 1 wird zwar behauptet, mit den dort beschriebenen Oberflächen könnte eine Verminderung der Wandreibung bis zu 10 % und mehr erreicht werden. Diese Aussage hält einer Überprüfung jedoch nicht stand.

Wandreibungsmessungen waren über lange Zeit nur mit einer Meßgenauigkeit in der Größenordnung von +/- 2 % möglich. Erst seit dem Bau einer speziellen Versuchsanlage, dem Berliner Ölkanaal, können Messgenauigkeiten von +/- 0,3 % erreicht werden [D. W. Bechert, G. Hoppe, J. G. T. van der Hoeven und R. Makris: The Berlin oil channel for drag reduction research, Exp. in Fluids 12, 251 bis 260 (1992)]. Durch die Verwendung von Öl als Fluid für die Strömung können die Messungen an vergrößerten Rippen durchgeführt werden. Dies erleichtert die Herstellung reproduzierbarer Testoberflächen. Weiterhin wurde die Meßgenauigkeit der Wandreibungsmessungen durch einen

Wandreibungs-Kraftvergleich mit einer glatten Referenzplatte gegenüber absoluten Wandreibungsmessungen modifiziert. Eine Überprüfung der aus der EP 0 205 289 A 1 bekannten Oberfläche mit keilförmigen Rippen ergab eine maximale Verminderung der Wandreibung von etwa 5 %. Die in der älteren Europäischen Patentanmeldung erwähnte Verminderung der Wandreibung um 10 und mehr Prozent konnte hingegen nicht bestätigt werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Oberfläche der eingangs beschriebenen Art aufzuzeigen, die unter den Randbedingungen einer leichten Herstellbarkeit und einer guten Stabilität der Rippen eine maximale Verminderung der Wandreibung ergibt.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß die Rippen keilförmig mit einem Keilwinkel von 20 ° bis 50 ° ausgebildet sind. Von der bekannten Anordnung der bekannten linienförmigen Rippen greift die Erfindung den deutlichen seitlichen Rippenabstand auf. Die Keilform mit einem Keilwinkel in dem angegebenen Bereich ist zwar an die aus der EP 0 205 289 A 1 bekannten Rippen angelehnt, dort ist der Keilwinkel aber signifikant größer und bei Rippen ohne seitlichen Rippenabstand vorgesehen. Mit der Erfindung kann die Wandreibung im Vergleich zu einer glatten Oberfläche um deutlich mehr als 7 % verringert werden und dies bei gegebener Dimensionierung der Rippen über einen vergleichsweise großen Bereich der Geschwindigkeit der die Wand turbulent überströmenden Strömung. Bei Anpassung der Oberfläche an eine Strömung bestimmter Geschwindigkeit können bis zu 8,5 % Wandreibungsverminderung erreicht werden.

Der normierte seitliche Rippenabstand  $s^*$ , welcher sich gemäß

$$s^* = (s / n_y) \cdot \sqrt{(\tau_{w0} / \rho)}$$

berechnet, wobei  $s$  der seitliche Rippenabstand,  $\tau_{w0}$  die Wandschubspannung einer glatten Referenzoberfläche, die der gleichen Strömung ausgesetzt ist,  $\rho$  die Dichte des Fluids und  $n_y$  die kinematische Zähigkeit des Fluids ist, beträgt vorzugsweise zwischen 12 und 22. Der optimale Bereich liegt bei 16 bis 18, das heißt bei einem  $s^*$ -Wert von circa 17.

Es versteht sich, daß der normierte Rippenabstand  $s^*$  an die normalerweise auftretende Strömungsgeschwindigkeit der die Wand überströmenden Strömung anzupassen ist. Dies bedeutet beispielsweise für eine Oberfläche eines Fahr- oder Flugzeugs, daß der normierte Rippenabstand  $s^*$  auf die Reisegeschwindigkeit des Fahr- oder Flugzeugs abzustimmen ist. Der sich so ergebende reale Rippenabstand  $s$  beträgt typischerweise 0,04 bis 0,10 mm. Das heißt, die Oberfläche weist durch die Rippen eine feine, geradezu mikroskopische Struktur auf.

Bei der Erfindung ist es nicht zwingend, daß die Rippen und die dazwischen befindlichen Oberflächenbereiche im Querschnitt jeweils durch Geradenab-

schnitte begrenzt werden. Die Oberfläche kann auch in gewissem Umfang abgerundet sein, um ihre Herstellbarkeit und ihre Stabilität noch weiter zu erleichtern. Dabei sollten aber die seitlichen Ansätze der Rippen einen Krümmungsradius von maximal 20 % des seitlichen Rippenabstands nicht überschreiten. Die Oberfläche zwischen den Rippen sollte keinen kleineren Krümmungsradius als das doppelte des seitlichen Rippenabstands aufweisen.

Unter dem Rippenabstand wird hier konkret das seitliche Rastermaß der Rippen verstanden und nicht der Freiraum zwischen zwei benachbarten Rippen. Bei der Erfindung ist ein solcher Freiraum jedoch immer vorhanden.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert und beschrieben. Dabei zeigt:

- Figur 1 eine von einer Strömung turbulent überströmte Wand im Längsschnitt längs der Strömungshaupttrichtung der Strömung,
- Figur 2 zwei Ausführungsformen der Oberfläche der turbulent überströmten Wand im Querschnitt quer zu der Strömungshaupttrichtung gemäß Figur 1,
- Figur 3 eine Auftragung zu der Verminderung der Wandreibung durch die Oberfläche gemäß Figur 2,
- Figur 4 eine Figur 2 entsprechende Darstellung von zwei nichterfindungsgemäßen Oberflächen, zu denen Vergleichswerte in der Auftragung gemäß Figur 3 wiedergegeben sind, und
- Figur 5 eine gegenüber Figur 2 b) abgewandelte erfindungsgemäße Oberfläche in einer noch weiter vergrößerten Darstellung.

In Figur 1 ist eine Wand 1 mit einer Oberfläche 2 schematisiert wiedergegeben. Die Wand 1 wird von einer Strömung 3 turbulent überströmt. Die Strömung 3 ist anhand von Strömungslinien dargestellt. An der Oberfläche 2 bildet die Strömung 3 Wirbel 4 aus, die die Überströmung der Wand 1 als turbulent qualifizieren. Abgesehen von den Wirbeln 4 bewegt sich die Strömung 3 in einer durch eine Pfeilspitze angedeuteten Strömungshaupttrichtung 5.

Die Oberfläche 2 der Wand 1 weist eine Struktur auf, die jedoch beispielsweise in Abstimmung auf die Überströmung eines Verkehrsflugzeugs sehr fein ist. Diese Struktur der Oberfläche 2 ist in Figur 2 in Form von zwei exemplarischen Beispielen vergrößert dargestellt. Die Oberfläche 2 weist mehrere jeweils nebeneinander und in der Strömungshaupttrichtung 5 gemäß Figur 1 ausgerichtete Rippen 6 auf. Die Rippen 6 weisen untereinander einen seitlichen Rippenabstand s

auf, dabei sind die Rippen 6 jeweils keilförmig ausgebildet mit einem Keilwinkel 7. Gemäß Figur 2 a.) beträgt dieser Keilwinkel 7 45°, gemäß Figur 2 b.) 30°. Die Höhe 8 der Rippen 6 beträgt s/2. Querschnitte durch die Oberfläche 2 setzen sich im wesentlichen aus Geradenabschnitten zusammen. Diese Geradenabschnitte begrenzen zum einen die Rippen 6 und bilden zum anderen die Oberflächenbereiche zwischen den Rippen 6 aus.

Die mit der Oberfläche 2 in den Ausführungsformen gemäß Figur 2 a.) und b.) erreichbaren Verminderungen der Wandreibung im Vergleich zu einer glatten Referenzoberfläche sind in Figur 3 dargestellt. Hier ist die relative Wandreibungsverminderung  $\Delta \tau / \tau_0$  in Prozent über einem normierten seitlichen Rippenabstand  $s^+$  aufgetragen. Der normierte seitliche Rippenabstand  $s^+$  berechnet sich gemäß

$$s^+ = (s / \eta y) \cdot \sqrt{(\tau_0 / \rho)}$$

aus dem tatsächlichen seitlichen Rippenabstand s, der Wandschubspannung  $\tau_0$  der glatten Referenzoberfläche, die der gleichen Strömung ausgesetzt ist, der Dichte  $\rho$  des jeweiligen Fluids und der kinematischen Zähigkeit  $\eta$  dieses Fluids. Die Normierung des seitlichen Rippenabstands auf  $s^+$  ergibt eine Art Reynoldszahl und ist etwa proportional der Strömungsgeschwindigkeit der die Wand überströmenden Strömung. Die beiden Kurven in der Mitte von Figur 3 betreffend die Oberflächen 2 gemäß Figur 2 a.) und 2 b.), wobei die obere mittlere Kurve mit den aufrechten Dreiecken der Oberfläche gemäß Figur 2 a.) zugeordnet ist und die untere mittlere Kurve mit den auf dem Kopf stehenden Dreiecken zu der Oberfläche gemäß Figur 2 b.) gehört. Aus Figur 3 ist ersichtlich, daß mit diesen beiden Oberflächen über einen weiten Bereich von  $s^+$ , das heißt über einen weiten Bereich von Strömungsgeschwindigkeiten eine Verminderung der Wandreibung gegenüber einer glatten Referenzoberfläche von 7 % und mehr erreichbar ist. Demgegenüber wird von der obersten Kurve mit den Sternen nur eine maximale Wandreibungsverminderung von 5 % erreicht. Die oberste Kurve gemäß Figur 3 entspricht der in Figur 4 a.) dargestellten Oberfläche 12 mit direkt aneinander angrenzenden, keilförmigen Rippen 16 die einen Keilwinkel 17 von etwa 60° aufweisen. Diese Oberfläche 12 entspricht der EP 0 205 289 A 1. Mit dieser Oberfläche 12 werden die dort behaupteten Wandreibungsverminderungen von 10 % und mehr tatsächlich nicht erreicht.

Solche Wandreibungsverminderungen sind nur mit der in Figur 4 b.) angedeuteten Oberfläche 22 erreichbar, die einzelne, linienförmige Rippen 26 aufweist. Zu der Oberfläche gemäß Figur 4 b.) gehört die Kurve ganz unten in Figur 3, bei der die einzelnen Meßpunkte jeweils durch ein x wiedergegeben sind. Die dargestellten Wandreibungsverminderungen von bis zu 10 % sind aber leider nur theoretisch, da die Oberfläche 22 gemäß Figur 4 b.) in Abstimmung auf relevante Strömungsge-

schwindigkeiten in tatsächlichen Fluida nicht herstellbar ist und bei gegebener Herstellbarkeit keine ausreichende Stabilität der Rippen 26 aufweisen würde.

Die erfindungsgemäße Oberfläche 2 gemäß Figur 2 ist herstellbar. Sie kann darüberhinaus modifiziert werden, um ihre Herstellbarkeit und Stabilität noch weiter zu erhöhen. Dies ist in Figur 5 angedeutet. Hier weisen die seitlichen Ansätze der Rippen 6 einen Krümmungsradius 9 und die Oberfläche 2 zwischen den beiden benachbarten Rippen 6 einen Krümmungsradius 10 auf. Jedoch beträgt der Krümmungsradius 9 weniger als 20 % des seitlichen Rippenabstands s, und der Krümmungsradius 10 ist mehr als doppelt so groß wie der seitliche Rippenabstand s. Krümmungen 11 an den freien Enden der Rippen 6 weisen einen Radius auf, der kleiner als 2 % des seitlichen Rippenabstands s ist. Durch diese Abrundung der Oberfläche 2 wird zwar die Herstellbarkeit der Oberfläche 2 verbessert und auch ihre Stabilität noch weiter erhöht, dennoch werden weiterhin annähernd dieselben Wandreibungsvermindierungen erreicht, die in Figur 3 dargestellt sind.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

1 -	Wand	
2 -	Oberfläche	
3 -	Strömung	
4 -	Wirbel	
5 -	Strömungshaupttrichtung	
6 -	Rippe	
7 -	Keilwinkel	
8 -	Höhe	
9 -	Krümmungsradius	
10 -	Krümmungsradius	
12 -	Oberfläche	
16 -	Rippe	
17 -	Keilwinkel	
22 -	Oberfläche	
26 -	Rippe	
s -	seitlicher Rippenabstand	40
s <sup>+</sup> -	normierter seitlicher Rippenabstand	
tau -	Wandschubspannung	
tau <sub>0</sub> -	Wandschubspannung einer glatten Referenzoberfläche	
rho -	Dichte des Fluids	45
ny -	kinematische Zähigkeit des Fluids	

#### Patentansprüche

1. Oberfläche für eine von einer Strömungshaupttrichtung aufweisenden Strömung turbulent überströmte Wand, mit in der Strömungshaupttrichtung ausgerichteten und seitlich zu der Strömungshaupttrichtung beabstandeten Rippen, deren Höhe 45 % bis 60 % des seitlichen Rippenabstands beträgt, dadurch gekennzeichnet, daß die Rippen keilförmig mit einem Keilwinkel (7) von 20 ° bis 50 ° ausgebildet sind.

2. Oberfläche nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der normierte seitliche Rippenabstand

$$s^+ = (s / ny) \cdot \sqrt{(\tau_{00} / \rho)}$$

12 bis 22 beträgt, wobei s der seitliche Rippenabstand, tau<sub>0</sub> die Wandschubspannung einer glatten Referenzoberfläche, die der gleichen Strömung ausgesetzt ist, rho die Dichte des Fluids und ny die kinematische Zähigkeit des Fluids ist.

3. Oberfläche nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der normierte Rippenabstand s<sup>+</sup> auf die Reisegeschwindigkeit eines die Oberfläche aufweisenden Fahr- oder Flugzeugs abgestimmt ist.
4. Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der seitliche Rippenabstand s 0,04 bis 0,10 mm beträgt.
5. Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die seitlichen Ansätze der Rippen (6) einen Krümmungsradius (9) von maximal 20 % des seitlichen Rippenabstands s aufweisen.
6. Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß sie zwischen den Rippen einen Krümmungsradius (10) von mindestens 200 % des seitlichen Rippenabstands aufweist.

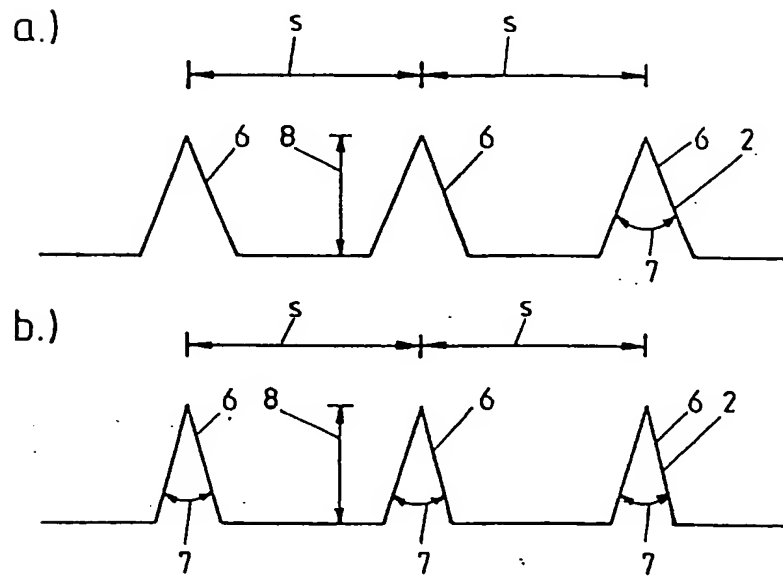
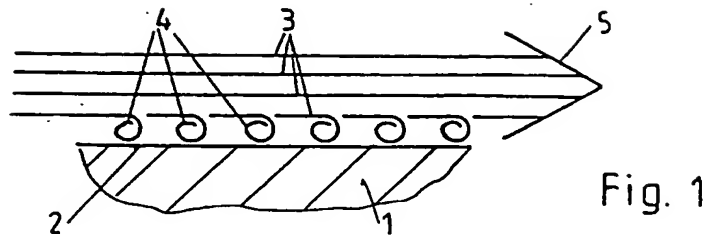


Fig.2

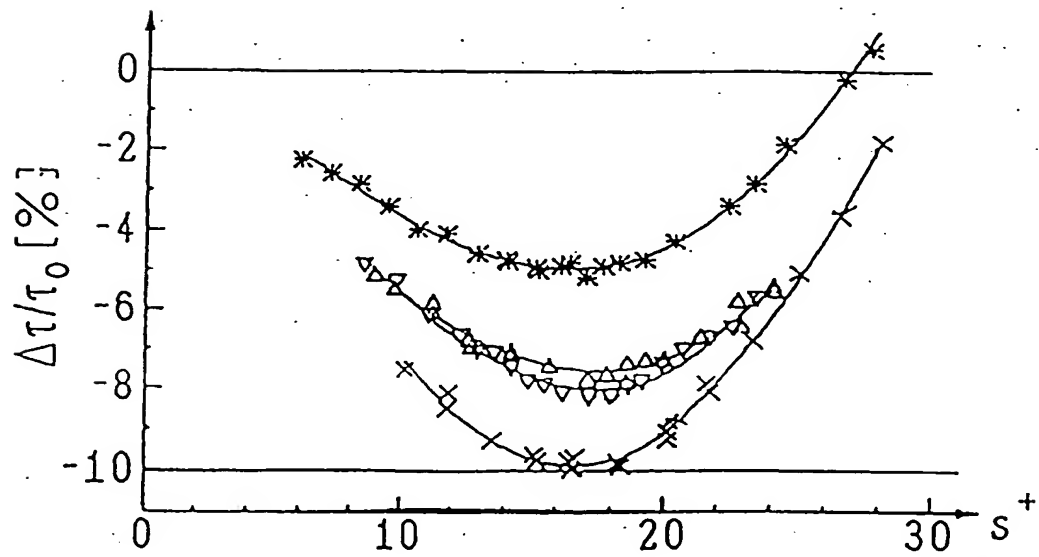


Fig. 3

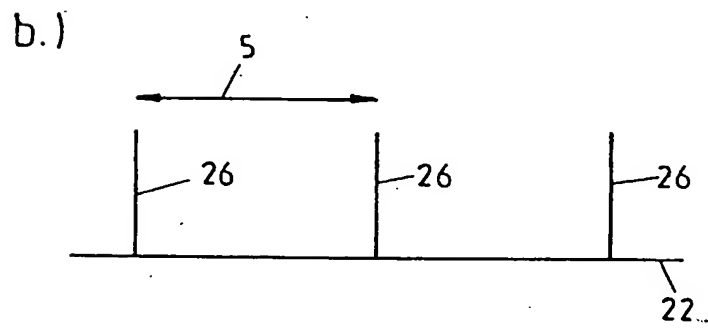
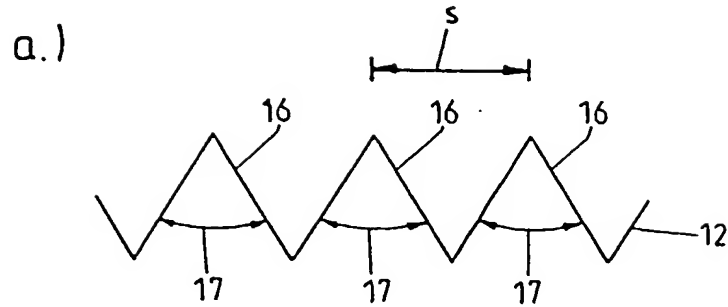


Fig. 4

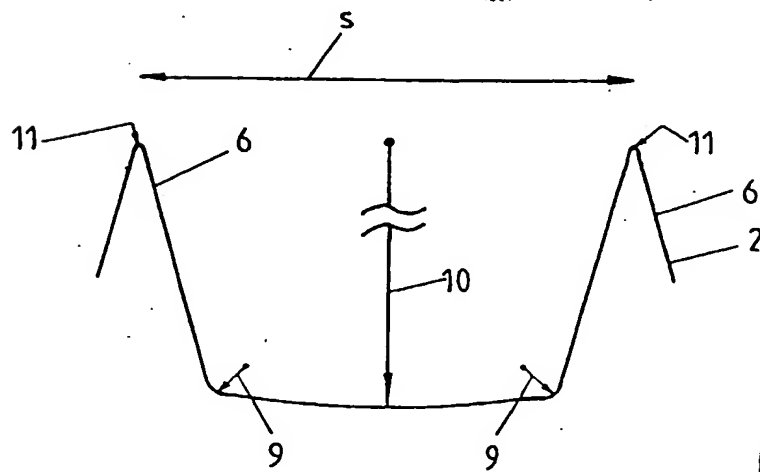


Fig. 5